

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA A DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL DE PEQUENO PORTE

Samuel Gustavo de Carvalho¹ (IC), Angie Lizeth Espinosa Sarmiento¹ (PQ)

¹Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

Palavras-chave: Coeficiente de Potência. Efeito de blocagem. Método de Glauert. Razão de ponta de pá.

Introdução

A matriz energética global ainda é predominantemente baseada em combustíveis fósseis, o que resulta em emissões significativas de gases de efeito estufa e contribui para as mudanças climáticas. Nesse contexto, as fontes de energia renováveis, como a energia eólica, ganham destaque como alternativas essenciais para promover a transição para uma matriz mais sustentável e reduzir a dependência de fontes poluentes. Com o aumento da demanda por energia limpa, a análise do desempenho de turbinas eólicas, especialmente as de pequeno porte, torna-se cada vez mais relevante (CIMBALA, 2018).

Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver uma metodologia experimental para avaliar o desempenho de turbinas eólicas de pequeno porte com eixo horizontal, utilizando uma bancada do tipo EEE da fabricante EDIBON, aprimorando o estudo desenvolvido por Duque (2023). A justificativa para este estudo está no potencial das turbinas eólicas de pequeno porte em contribuir para a geração de energia descentralizada, atendendo tanto áreas urbanas quanto rurais. Além disso, há uma carência de estudos que abordem de forma aprofundada o efeito de blocagem em cenários com altos índices de blocagem, um fator crucial para a precisão de experimentos e para o aprimoramento dessas tecnologias.

A metodologia proposta envolve a aplicação de técnicas de medição e a elaboração de um procedimento de correção do efeito de blocagem, fundamentadas no método proposto por Glauert (1933). Foram realizados ensaios experimentais, comparando os resultados obtidos com estudos anteriores e refinando o processo de análise do desempenho de turbinas eólicas de pequeno porte.

Metodologia

Os ensaios foram realizados utilizando a unidade de energia eólica da fabricante EDIBON, mostrada na Figura 1, que foi modificada por Fonseca (2022) para ter uma seção transversal circular com diâmetro de 0,55 m.

A Figura 2 mostra a turbina de eixo horizontal, com diâmetro externo de 0,5 m, a qual pode ser configurada para utilizar 2, 3 ou 6 pás. O ventilador axial, com potência elétrica de 1,5 kW, fornece o fluxo de ar para os testes, podendo ter sua rotação controlada através de um potenciômetro. Um módulo de corrente contínua possibilitou a conexão a um reostato com 13 ajustes, variando a resistência total do circuito e, com isso, a rotação da turbina. Para analisar o perfil de velocidades, utilizou-se um anemômetro de fio quente REED AM-4204, e a rotação da turbina foi medida com um tacômetro a laser KR98. O processamento dos dados e a geração dos gráficos foram feitos com os softwares Excel® e Grapher®.



Figura 1 - Bancada EEE da fabricante EDIBON. Fonte: Manual da bancada EEE EDIBON (2018)



Figura 2 - Turbina instalada na seção de testes. Fonte: Autoria própria.

Antes é necessário definir a configuração da Turbina Eólica de Eixo Horizontal (TEEH). Os parâmetros são: o tipo de aerofólio, o número de pás, que para turbina padrão da bancada pode ser configurada com

2, 3 ou 6 pás, ângulo de guinada (γ), que define a orientação da turbina em relação ao vento, e o ângulo de montagem das pás (β). No presente estudo, foram utilizados o aerofólio padrão da bancada EDIBON (não especificado pela fabricante), uma configuração de montagem com 3 pás, e os ângulos β e γ iguais a 0° .

O experimento foi realizado em duas etapas principais. Primeiro, o perfil de velocidade do escoamento de ar na seção de testes foi levantado. Em seguida, foram coletados três parâmetros principais: tensão, corrente e rotação do rotor. O perfil de velocidades na seção de testes da bancada eólica é medido com o anemômetro de fio quente, posicionado 300 mm à frente da turbina. A seção de teste, circular e simétrica, permite medições ao longo de um único eixo, em intervalos de 50 mm, cobrindo um diâmetro de 500 mm. Com esses valores, pode-se construir um polinômio de sexto grau para representar o perfil de velocidades e aplicá-lo na Equação 1, utilizando limites de integração b e c de 0,05 a 0,5 m respectivamente, para calcular a velocidade média do escoamento.

$$\bar{v} = \frac{\int_b^c f(x) dx}{(c - b)} \quad (1)$$

Onde \bar{v} é a velocidade média do escoamento, b e c os limites de integração e $f(x)$ o polinômio do sexto grau ajustado aos dados experimentais.

Em seguida, devem ser coletados três parâmetros principais: tensão, corrente e rotação do rotor. As medições de tensão e corrente são feitas com multímetros, e a rotação determinada por um tacômetro a laser. Variando o reostato, tem-se 13 pontos diferentes de medição. Os dados coletados são inseridos no Excel para processamento, e após o experimento, o equipamento deve ser desligado para garantir a segurança. O processamento dos dados visa construir a curva característica da TEEH, a qual pode ser usada para determinar o seu desempenho. As Equações 2 a 6, são utilizadas no processamento desses dados.

$$A = \pi R^2 \quad (2)$$

$$P_{DISP} = \frac{1}{2} \rho A \bar{v}^3 \quad (3)$$

$$P_{EL} = VI \quad (4)$$

$$C_P = \frac{P_e}{P_{DISP}} \quad (5)$$

$$TSR = \lambda = \frac{\omega R}{\bar{v}} \quad (6)$$

Onde, A é a área varrida pelo rotor, R é o raio externo da turbina, P_{EL} é a potência elétrica, V é a tensão elétrica, I é a corrente elétrica, C_P é o coeficiente de potência, P_e é

a potência de eixo, P_{DISP} é a potência disponível no escoamento, TSR (ou λ) é a razão de ponta de pá e ω é a velocidade angular do rotor. Devido a atual configuração da turbina não possibilitar o cálculo da potência de eixo, será utilizada a potência elétrica em seu lugar para o cálculo do coeficiente de potência.

O principal desafio do estudo é o efeito de blocagem, que aumenta as forças de empuxo e a potência em turbinas devido à proximidade das paredes da bancada eólica com a turbina, causando aumento da velocidade do escoamento, variações na pressão da esteira e gradientes de pressão longitudinais (Glauert, 1933; Pope e Harper, 1966). A relação entre a área varrida pela turbina e a área da seção de testes é denominada Índice de Blocagem (α), o qual pode ser calculado pela Equação 7 e que para o presente estudo é de aproximadamente 82%. O método de Glauert, consiste em calcular a velocidade corrigida (U'), através de sistemas de equações, a qual pode ser utilizada para corrigir as distorções causadas pelo efeito de blocagem. Contudo, diante da complexidade na resolução das equações de Glauert, técnicas de extrapolação e interpolação polinomial foram empregadas nos valores fornecidos por Ryi *et al.* (2015), de modo a generalizar o método para índices de blocagem superiores aos estudados pelo autor. A Figura 3 exhibe as curvas de velocidade do vento corrigida (U') em função do coeficiente de força axial (C_T), extrapoladas e interpoladas, permitindo a correção em uma ampla gama de coeficientes de força axial e índices de blocagem de 10% a 90%, tornando o método abrangente e adaptável a diferentes condições. Os valores de C_T podem ser calculados através das Equações (8) e (9), usando os valores experimentais de C_P .

$$\alpha = A/A' \quad (7)$$

$$C_P = 4a(1 - a)^2 \quad (8)$$

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (9)$$

Onde α é índice de blocagem, A é a área varrida pelo rotor, A' é a área da seção de testes da bancada eólica, C_T é o coeficiente de força axial e a o fator de indução axial. Após estimar o valor da velocidade do escoamento corrigida, os parâmetros de interesse podem ser corrigidos através das Equações (10) e (11).

$$C'_P = C_P \frac{1}{U'^3} \quad (10)$$

$$\lambda' = \lambda \frac{1}{U'} \quad (11)$$

Onde C'_P é o coeficiente de potência corrigido, λ' é a razão de ponta de pá corrigida e U' é a velocidade do escoamento corrigida.

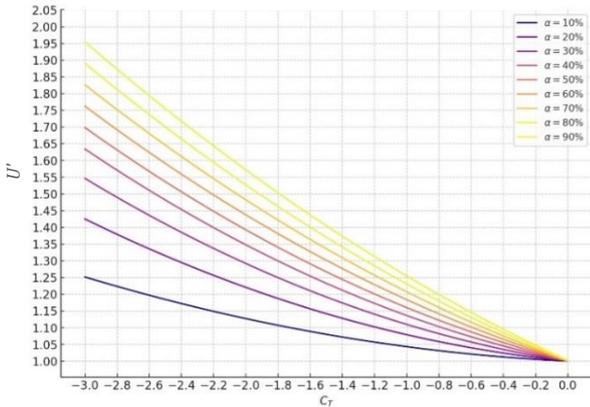


Figura 3 – Relação entre a velocidade de vento corrigida (U') e coeficiente de força axial (C_T) para diferentes índices de blocagem (α). Fonte: Autoria própria.

Finalmente, com os valores corrigidos de C_P e λ , é realizado um ajuste com um polinômio do 3º grau utilizando o Excel para traçar a curva característica da TEEH, utilizando os 13 pontos calculados.

Resultados e discussão

A Figura 4 apresenta os pontos medidos e a regressão polinomial de 6º grau para o perfil de velocidades nas cinco rotações do ventilador axial, com a legenda indicando as respectivas velocidades médias.

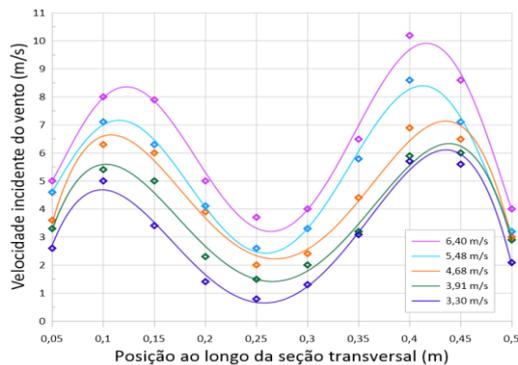


Figura 4 - Perfis de velocidade do escoamento com a turbina dentro da bancada eólica em 5 velocidades do vento diferentes. Fonte: Autoria própria.

Os perfis de velocidade encontrados no estudo diferem significativamente de um escoamento livre, que é a condição real de operação das turbinas eólicas. Enquanto o escoamento livre seria mais uniforme, o perfil no estudo foi influenciado pelo ventilador axial. Nesse caso, observa-se maiores velocidades entre a parede e o centro, devido à influência das pás do ventilador axial, velocidades menores ao centro, a frente do cubo do ventilador, o qual não gera escoamento, e uma redução de velocidade próxima à parede, conforme o princípio do

escorregamento nulo. A Figura 5 mostra os valores calculados, antes da correção, e as funções cúbicas ajustadas para as cinco velocidades médias, resultando nas curvas características de cada velocidade. Nessas curvas, o ponto de maior rendimento, onde o coeficiente de potência é máximo, identifica o TSR de projeto, chamado de ponto de projeto. Conhecer esse ponto é crucial para turbinas eólicas, pois permite ajustar mecanismos reguladores para manter a operação na máxima eficiência pelo maior tempo possível.

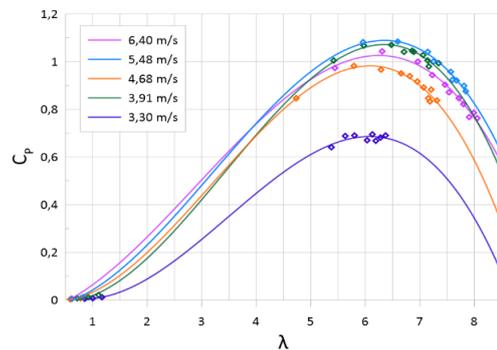


Figura 5 - Coeficiente de potência em função da Razão de ponta de pá antes da correção, para 5 velocidades médias de incidência do vento. Fonte: Autoria Própria.

A Figura 6 compara duas curvas características para uma velocidade média de escoamento semelhante: uma corrigida pelo método de Glauert (presente estudo) e outra pelo método de Bahaj (Duque, 2023). O ponto de projeto do presente estudo mostra que o rendimento máximo da turbina ocorre para uma Razão de Ponta de Pá, λ , e um Coeficiente de Potência, C_P , menores do que os obtidos por Duque (2023).

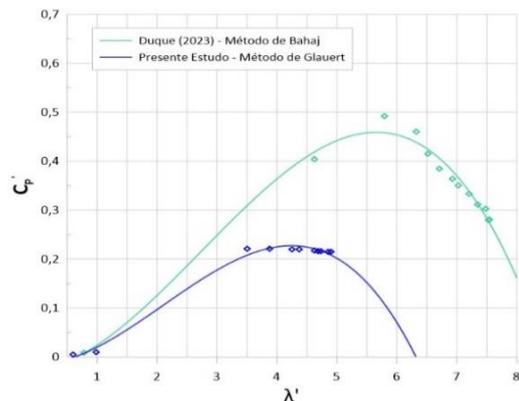


Figura 6 - Comparação entre as curvas características obtidas por Duque (2023), $\bar{v} = 3,98$ m/s, e o presente estudo, $\bar{v} = 3,91$ m/s, antes da correção. Fonte: Autoria própria.

A elevada eficiência corrigida no trabalho de Duque (2023) indicava uma correção insatisfatória, pois como visto em Ryi *et al.* (2015), os valores de C_P obtidos foram inferiores a 0,4 para uma turbina mais eficiente, enquanto

os resultados do presente estudo sugerem uma correção mais eficaz, evidenciada pela redução na razão de ponta de pá, λ , e no coeficiente de potência, C_p .

Já a Figura 7 apresenta, finalmente, as curvas características do presente estudo para as cinco velocidades médias de escoamento, já corrigidas pelo método de Glauert. Nota-se que todas as curvas estão bastante próximas entre si, resultando em pontos de projeto também muito similares para os cinco casos analisados. Esse comportamento é esperado, uma vez que as variações de velocidade não são muito intensas. Nessa faixa de velocidades, é razoável supor que o ponto de projeto não se altere de forma significativa.

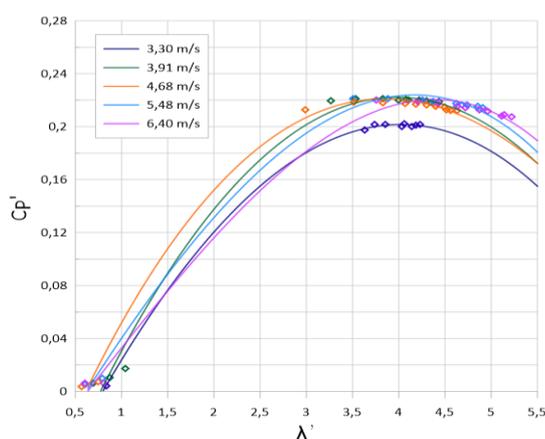


Figura 7 - Curvas características, obtidas no presente estudo, corrigidas pelo método de Glauert para 5 velocidades médias de escoamento distintas. Fonte: Autoria Própria.

A Figura 7 mostra que a Turbina Eólica de Eixo Horizontal (TEEH) da bancada EEE da EDIBON, na configuração utilizada, atinge seu ponto de projeto com máxima eficiência em uma TSR próxima de 4, para velocidades entre 3,30 m/s e 6,40 m/s, com um coeficiente de potência entre 0,20 e 0,22. Portanto, ao garantir que a turbina opere com uma TSR próxima de 4, pode-se afirmar que ela estará funcionando em sua máxima eficiência. Entretanto, é importante destacar que coleta e análise de dados precisam ser aprimoradas, especialmente considerando a futura instalação de sensores para medir a potência de eixo, o que trará maior precisão. Além disso, a influência do escoamento do ventilador axial, não totalmente considerada, sugere a necessidade de revisar a estimativa da potência disponível. Por fim, a eficácia do método de Glauert ainda não foi validada, por outros estudos, para altos índice de blocagem como os do presente trabalho.

Conclusões

Evidencia-se, portanto, o cumprimento dos objetivos,

desenvolvendo uma metodologia experimental para avaliar o desempenho de turbinas eólicas de pequeno porte, utilizando a bancada EEE da EDIBON. O método de correção de Glauert foi aplicado com sucesso, corrigindo os desvios causados pelo efeito de blocagem. A metodologia de Duque (2023) foi aprimorada, resultando em valores mais coerentes de coeficiente de potência, C_p , e Razão de ponta de pá, λ . Apesar dos resultados satisfatórios, o estudo sugere a instalação de sensores para medir diretamente a potência de eixo e uma revisão no método de análise da potência disponível, P_{DISP} , devido a variações de velocidade do ventilador axial. Por fim, o método de Glauert requer mais validações para índices de blocagem elevados.

Agradecimentos

À FAPEMIG, processo APQ-00653-22, edital 001/2022, referente ao projeto: “Análise Numérica e Experimental de Microgeradores Eólicos para Aplicações em Regiões Remotas no Brasil”, com registro na DPI UNIFEI número PVDI297-2022, e ao Programa PIBIC CNPq pelo suporte financeiro. Agradeço também à Universidade Federal de Itajubá e aos professores e alunos do Grupo FDT (Fluid Dynamics and Turbomachinery) – UNIFEI por todo o aprendizado durante o desenvolvimento da IC.

Referências

- GLAUERT, H. Wind tunnel interference on wings, bodies and airscrews. Aeronautical Research Committee, Reports and Memoranda No. 1566, 1933.
- RYI, J. et al. Blockage effect correction for a scaled wind turbine rotor by using wind tunnel test data. *Renewable Energy*, v. 79, p. 227–235, jul. 2015.
- POPE, A.; HARPER, J. J. *Low Speed Wind Tunnel Testing*. New York: John Wiley & Sons, 1966.
- FONSECA, F. de P. O. Projeto de Instrumentação da Bancada de Ensaio Aerodinâmicos e Elaboração de Procedimentos Experimentais para Testes de Aero geradores. 2022 <UNIFEI>
- DUQUE, P. E. Metodologia para a determinação do desempenho aerodinâmico de turbinas eólicas de eixo horizontal de pequeno porte em uma bancada eólica modelo EEE (EDIBON). 2023 <UNIFEI>
- CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Fluid Mechanics Fundamental and Application*. London, OH, USA: McGraw Hill Higher Education, 2018.